

# 综合物探法在砂岩型铀矿中深部找矿中的实践与分析——以新疆昭苏盆地为例

黄建乐 陈晓冬 李家金 善曹特 郝以泽

(核工业二一六大队 新疆乌鲁木齐 830011)

**[摘要]**为了探查新疆昭苏盆地砂岩型铀矿的异常信息,选择可控源音频大地电磁测量、高精度磁测和土壤氡气测量三种物探方法,并简要介绍各方法的工作原理。通过分析昭苏盆地的地质特征、物性特征和本区的找矿难点,对昭苏盆地综合物探数据所蕴含的信息进行地质-物探综合解译。实践证明:可控源音频大地电磁测量对低阻和高阻体均有良好的电性响应,可以划分地层、推断断裂构造;高精度磁测可以推断氧化还原界面,辅助解释断裂构造;土壤氡气测量可辅助解释断裂构造,对地下铀矿体有指示作用,三种方法的技术特性相互补充,提高了物探解释的准确性。突破了伊犁盆地以往 600 m 的找矿深度,并以电性稳定的中阻厚层、磁测异常、氡异常偏高晕和峰-谷状曲线作为预测标志,解决了深埋藏条件下赋矿地质体的圈定难点,在昭苏盆地砂岩型铀矿中、深部找矿工作中取得了良好的效果。

**[关键词]** 砂岩型铀矿 CSAMT-高精度磁测-土壤氡气测量 综合物探 电阻率 中深部找矿 昭苏盆地 新疆

**[中图分类号]** P619.14 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 0495-5331(2021)05-1099-08

Huang Jianle, Chen Xiaodong, Li Jiajin, Shan Caote, Hao Yize. Prospecting middle and deeply buried sandstone-type uranium deposits beneath the Zhaosu Basin, Xinjiang by integrated geophysical methods [J]. *Geology and Exploration* 2021, 57(5): 1099-1106.

## 0 引言

铀资源作为我国 26 种重要矿产之一,是我国重要的战略资源和能源矿产(蔡煜琦等,2015)。铀矿地质工作者经过多年的艰苦努力,陆续在伊犁盆地、吐哈盆地、鄂尔多斯盆地等地区取得重要突破(张金带,2003),查明和提交了数个大型、特大型砂岩型铀矿床,但埋藏浅、易于勘探的砂岩型铀矿床越来越少(罗齐彬等,2018)。目前我国在运营核机组数量 48 台,装机容量位居世界第三,在建机组 11 台,在建规模保持世界第一,未来对铀资源的需求也必将日趋紧迫。为扩大铀资源储量,提高铀资源对我国核电发展的保障程度,笔者开展昭苏盆地砂岩型铀矿找矿工作。

昭苏盆地砂岩型铀矿主要受构造、铀源、层间氧化带和沉积体系等因素控制(陈奋雄等,2016),具有构造发育、目的层埋深大和沉积体系复杂的特点

(刘红旭,2015;王伟等,2019)。针对上述情况采用了综合物探法,分别探测电阻率、磁性和放射性特征,以快速地查清工作区的基底形态、矿体位置、构造和找矿目的层发育特征(王耀辉,2012)。

## 1 工作区地质特征

### 1.1 地质概况

昭苏盆地位于伊犁盆地的西南缘,在大地构造单元划分上归属于天山造山带中的伊犁-中天山微地块(张金带等,2010;丁波等,2019),属于准噶尔-哈萨克斯坦板块次级构造单元,是在造山带中相对稳定的元古界和古生界基底地块基础上发展起来的裂陷-拗陷复合型盆地(李盛富和王谋,2006)。盆地具有多层复合基底,可以分为元古界和古生界褶皱基底,地层包括震旦系、志留系、石炭系、二叠系。盆地盖层由中生代地层组成,地层包括侏罗系、新近系和第四系。沉积环境为近物源山间内陆

[收稿日期]2020-06-02;[改回日期]2021-02-22;[责任编辑]陈伟军。

[基金项目]中央财政地勘费项目新疆塔里木盆地乌恰-轮台地区铀矿资源调查评价与勘查(编号:201907)资助。

[第一作者]黄建乐(1987年-),男,2010年毕业于东华理工大学,勘查技术与工程专业本科学位,主要从事地球物理勘查工作。E-mail: 365429280@qq.com。

湖相,沉积体系发育较完善,发育有冲积扇、河流相、湖相和扇三角洲相。元古界和古生界基底成为盆地沉积的剥蚀区,为盆地中新世代沉积提供丰富的物源(任满船等 2011)。

昭苏盆地经历了印支-燕山-喜山期一系列强

烈的多旋回、多次活化的构造运动,断裂构造极为发育。盆地内以特克斯河断裂为界,表现为北强南弱的构造特征,并发育有近 EW 向和 NS 向两组程度不同的断裂构造,将盆地分割成若干个大小不一的近似菱形的地块(图 1)。

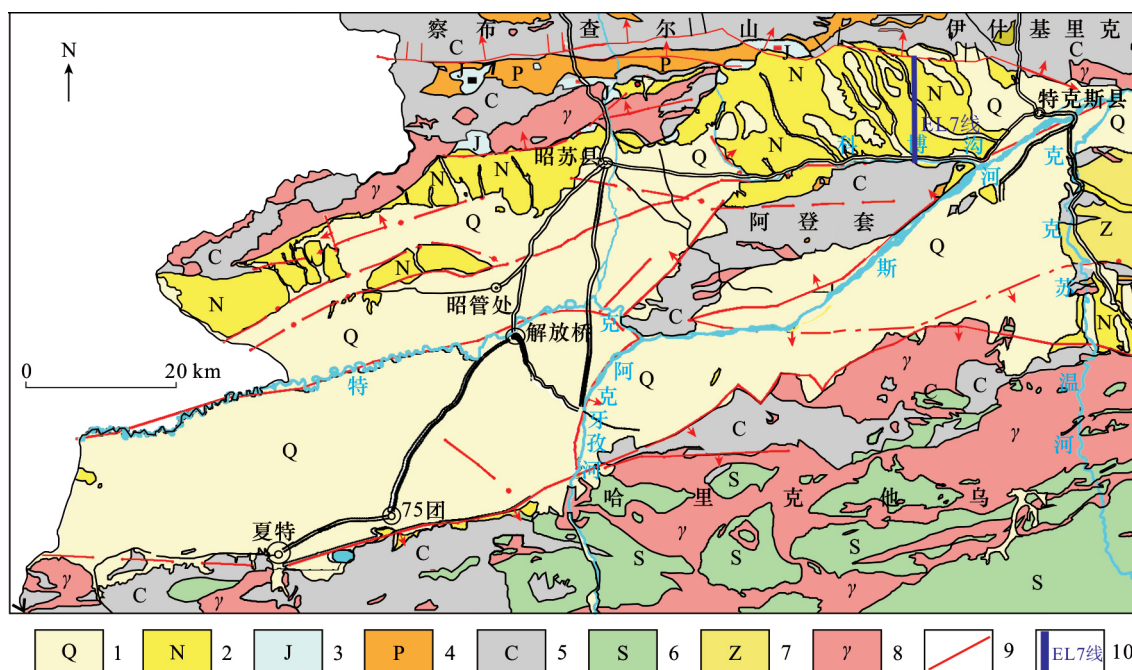


图 1 昭苏盆地地质简图

Fig. 1 Geological sketch of the Zhaosu Basin, Xinjiang

1 - 第四系; 2 - 新近系; 3 - 侏罗系; 4 - 二叠系; 5 - 石炭系; 6 - 志留系; 7 - 震旦系; 8 - 侵入岩; 9 - 断层; 10 - EL7 测线  
1 - Quaternary; 2 - Neogene; 3 - Jurassic; 4 - Permian; 5 - Carboniferous; 6 - Silurian; 7 - Sinian; 8 - intrusive rock; 9 - fault; 10 - EL7 line

## 1.2 地层与岩性

震旦系分布在盆地东端大哈拉军山,是一套以灰绿-灰黑色千枚岩夹石英岩、千枚岩化粉砂岩、砂岩的正常碎屑及浅海相碳酸盐岩沉积。志留系分布于盆地南部哈里克他乌山北坡一带,为一套片麻岩、混合岩、片岩、千枚岩、大理岩组成的变质岩系。石炭系广泛分布于盆地北部察布查尔山、伊什基里克山,南部哈里克他乌山及中部阿登套山、大哈拉军山等地,岩性为中性、酸性熔岩、喷发岩、碎屑岩等。二叠系分布于盆地北部边缘,呈东西向条带状分布,并在阿登套山有少量分布,为紫红-暗紫红的砾岩、砂岩、泥岩等,为一套山麓堆积的红色磨拉石建造。侏罗系断续出露于盆地北部边缘,为一套三角洲相和浅湖相、河流-湖沼相的含煤碎屑沉积,岩性为浅红色、褐色、灰色、灰白色、灰黄色及灰黑色的含砾砂岩、砂砾岩、砂岩、泥质砂岩、泥岩。新近系分布范围与盆地轮廓基本一致,为一套暗褐色、红褐色、浅红褐色的砾岩、砂砾岩、砂质泥岩、粉砂质泥岩、泥岩

等,偶见砂岩层。第四系在盆地分布广泛,岩性为松散的砂砾、含砂的粘土等。

## 1.3 含矿层岩性及岩相

昭苏盆地侏罗系地层铀含量最高达  $200 \times 10^{-6}$  (李盛富等 2018), Th/U 值为 0.39 ~ 0.49,并发育有氧化带,是主要含矿层位。该套地层为潮湿环境下形成的暗色含煤碎屑岩建造,为灰色、灰白色夹褐黄色及灰黑色的砾岩、砂砾岩、砂岩、泥质砂岩、泥岩、炭质泥岩夹薄煤层、煤线,底部以一套砾岩、砂砾岩作为分层标志。岩相为河流-湖沼相、冲积扇相-扇三角洲相,蚀变普遍发育。

## 1.4 铀源与铀成矿机制

昭苏盆地蚀源区广泛出露的中酸性侵入岩和石炭系海相火山岩,其铀含量高达  $13 \times 10^{-6}$ ,平均  $7 \times 10^{-6}$ ,为该地区铀成矿提供较丰富的铀源。

蚀源区出露的中酸性侵入岩和石炭系中分散状态的铀易被活化,经过风化、淋滤作用转入地下水中,并以含铀含氧地下水的形式向侏罗系地层补给,

在向盆地内迁移的过程中与还原介质发生还原反应 (蒋宏等 2015), 最终在氧化还原界面处富集成矿 (陈聪等 2017)。

2 工作区地球物理特征

2.1 磁性特征

采用磁化率仪测定岩石标本的磁化率, 并统计多种岩性的磁化率, 岩性包括花岗岩、砂砾岩、砂岩、泥岩等。磁性特征多表现为无磁性, 磁化

率范围( $0 \sim 356$ )  $\times 10^{-6}$ SI; 侏罗系灰色砂岩中富含有机质等还原介质, 其中的铁质胶结物呈还原状态, 磁化率偏高, 磁化率范围( $898 \sim 10990$ )  $\times 10^{-6}$ SI; 侏罗系褐色砂岩中的铁质胶结物呈氧化状态, 其磁化率低于还原状态下的铁质胶结物, 磁化率范围( $118 \sim 2419$ )  $\times 10^{-6}$ SI。根据砂体在氧化和还原状态下的磁性差异 (陈虎等 2015), 可利用高精度磁测探查铀矿体的位置 (刘祜等, 2009) (表 1)。

表 1 昭苏盆地地层磁化率统计表  
Table 1 Statistics of formation susceptibility in Zhaosu Basin

地层	岩性	样本数(块)	磁化率( $\kappa \times 10^{-6}$ SI)	
			平均值	变化范围
第四系(Q)	黄土、冲洪积物	2319	43	0 ~ 297
新近系(N)	泥岩、砂岩、砾岩	478	35	0 ~ 277
	褐色砂岩	28	918	118 ~ 2419
侏罗系(J)	灰色砂岩	35	3735	898 ~ 10990
	砾岩、砂岩、砂岩夹煤层	652	18	0 ~ 169
二叠系(P)	砂岩、砾岩	255	46	32 ~ 189
石炭系(C)	砂岩、砾岩	1361	27	0 ~ 356
	花岗岩	322	33	0 ~ 334
志留系(S)	砂岩	671	16	0 ~ 104

2.2 放射性特征

利用孔内连续伽玛测井数据统计了昭苏盆地各地层的铀元素含量。其中第四系和新近系铀含量较低, 均值( $2.14 \sim 2.20$ )  $\times 10^{-6}$ ; 侏罗系铀含量偏高, 均值( $1.60 \sim 3.12$ )  $\times 10^{-6}$ ; 石炭系

的侵入岩花岗岩中铀含量较高, 均值最高达  $27.20 \times 10^{-6}$ , 具有较高的放射性背景场。当目的层中含有铀元素时, 可采用该方法探测土壤中氡气分布特征 (杨龙泉等 2020), 查明矿体位置和构造发育情况 (表 2)。

表 2 昭苏盆地测井数据统计表  
Table 2 Statistics of gamma logging data in Zhaosu Basin

地层	岩性	铀含量( $\times 10^{-6}$ )			三侧向视电阻率( $\Omega \cdot m$ )		
		均值	方差	样数(块)	均值	方差	样数(块)
第四系(Q)	黄土、冲洪积物	2.14	0.52	3800	49.80	32.71	3800
新近系(N)	泥岩、砂岩、砾岩	2.20	0.56	4000	8.10	28	4000
	含砾粗砂岩	1.82	0.72	500	71.23	10.8	500
	粗砂岩	1.60	0.55	118	51.21	9.02	118
	中砂岩	1.61	0.45	257	16.63	2.7	257
	细砂岩	1.67	0.71	125	12.88	17	125
侏罗系(J)	粉砂岩	1.89	0.50	103	10.86	0.89	103
	泥质粉砂岩	2.58	0.60	1600	8.80	0.89	1600
	泥岩	2.42	0.47	355	7.20	0.29	355
	炭质泥岩	3.12	2.88	15	9.86	0.71	15
	煤	2.17	0.58	27	66.98	16.21	27

续表 2

Continued Table 2

地层	岩性	铀含量( $\times 10^{-6}$ )			三侧向视电阻率( $\Omega \cdot m$ )		
		均值	方差	样数( 块)	均值	方差	样数( 块)
石炭系( C )	凝灰岩	16.23	3.16	26	395.7	45.8	26
	安山玢岩	10.83	3.67	8	813.3	52.26	8
	花岗岩	27.20	3.44	61	215.4	34.63	61

### 2.3 电性特征

利用孔内连续电阻率测井数据统计了昭苏盆地各地层的电阻率。第四系视电阻率值较大,均值为  $49.80 \Omega \cdot m$ ; 新近系岩性以泥质为主,视电阻率呈稳定的低阻,均值为  $8.1 \Omega \cdot m$ ; 侏罗系岩性有泥岩、砂岩和煤,视电阻率随粒径的减小而减小,具体为从砾岩类—粗砂岩—中砂岩—细砂岩到泥岩视电阻率值依次减小,均值由  $71.23 \Omega \cdot m$  递减到  $7.20 \Omega \cdot m$ 。其中粗砂岩和含砾粗砂岩的视电阻率均值较高,在  $(51.21 \sim 71.23) \Omega \cdot m$  之间,煤因含有有机质视电阻率较高,中砂岩、细砂岩、粉砂岩的视电阻率均值在  $(10.86 \sim 16.63) \Omega \cdot m$  间,泥岩的视电阻率均值小于  $10 \Omega \cdot m$ (表 2)。当不同岩性具有电性差异时,可采用可控源音频大地电磁测量探测地层结构、构造发育情况,寻找有利成矿空间。

### 2.4 含矿层物性特征

含矿层为侏罗系砂岩,具有如下物性特征:

(1) 侏罗系为碎屑岩沉积,一般为无磁,含矿地段磁性偏高,磁化率范围  $(0 \sim 10990) \times 10^{-6} SI$ ;

(2) 铀含量偏高,均值最高达  $3.12 \times 10^{-6}$ ,当地层中含矿时,呈局部放射性高值;

(3) 电性特点表现为电性较稳定的中阻层。

## 3 综合物探找矿方法及原理

### 3.1 找矿难点及综合物探技术路线

(1) 昭苏盆地铀矿找矿工作难点: 工作区铀矿工作程度较低(郭庆银等 2012),构造极为发育,地层划分比较困难; 侏罗系埋藏深度大,上覆地层为低阻,地震勘探在当地使用受限,普通电阻率法又无法达到勘探深度,找矿工作存在挑战性(秦守萍 2019)。

(2) 综合物探工作的技术路线: 以盆缘发现的少量侏罗系、煤和放射性异常点为线索,布设综合物探测线,测线跨盆地南缘古生界至北缘古生界地层。将综合物探成果结合地质资料划分地层、探查构造,快速、高效地探查基底形态和埋深。

### 3.2 土壤氡气测量

氡是惰性气体,具有放射性,是镭和钍衰变产生

的子体,部分不受晶格约束称之为自由氡(付锦和韩耀照 2003)。自由氡像其他气体一样,能够在土壤、岩石中以流通和扩散等方式不断向地表做长距离迁移(张赓等 2013),并在铀矿体、断裂带及岩性分界线附近形成氡浓度高值或异常(王浩峰等 2019)。当目的层中含有一定量铀元素时,可利用其运移特性研究氡及其子体在地层中分布特征(邓居智等 2004)。土壤氡气异常的性质与铀矿体具有直接相关性,可指示含矿位置,并辅助解释构造分布情况(韩姚飞等, 2021),多年来被证实是寻找铀矿的有效方法之一。

### 3.3 高精度磁测量

高精度磁法测量是发展最早、应用最广的一种物探技术方法,其工作原理是通过观测和分析地壳内部各种岩、矿石的磁异常场特征(张立剑等, 2013),来研究地质构造和寻找矿产资源。工作区内各地层多为无磁性(冯旭亮和刘斌 2019),侏罗系黄褐色砂岩中铁质胶结物呈氧化状态,磁化率偏低,灰色砂岩中铁质胶结物呈还原状态,磁化率偏高(付锦等 2015),可以间接探测铀矿体分布情况; 沉积岩中的断裂构造经构造改造,在沉积岩层间破碎带内充满填充物(冷冬灵 2000),断裂处磁异常呈低值,可辅助推断断裂分布。

### 3.4 可控源音频大地电磁测量

可控源音频大地电磁测量(CSAMT)是 20 世纪 80 年代末兴起的一种地球物理新技术,具有分辨率高、信噪比高、探测深度大和快速高效等优点。近年来,该方法在地质普查、石油、天然气勘探、地热、水文、环境等多个领域得到广泛应用。该方法的工作原理是以有限长接地导线为场源,在距偶极中心一定距离处测量地层电阻率特征的一种频率域测深技术。工作区各岩性间具有显著电性差异,可使用该方法探测地层的地电结构、划分地层、岩体和构造断裂的边界(李英宾等 2019),探测目的层空间形态和深度,预测有利成矿部位。

## 4 综合物探法典型剖面分析

昭苏盆地东北部发现少量侏罗系露头,据此线

索布设 EL7 线。该测线北端起于石炭系,中段地表主要以新近系为主,南端终于石炭系,旨在查明该地段中新生界分布范围、划分地层和基底的埋深、形态以及断裂构造发育情况。

4.1 土壤氡浓度特征

氡气浓度总体表现为背景场,局部存在多处高值,由北向南逐渐升高趋势。受地表切割影响,剖面中多呈小幅变化,其中剖面 2800 m、7000 m 和 16420 m 处土壤氡气浓度高值幅度达到偏高晕,氡气浓度曲线在相应位置处呈近“M”状的双峰夹一谷或单峰伴一谷形态(图 2)。

4.2 磁异常特征

磁异常特征表现多为无磁和弱磁性特征,ΔT 曲线呈由南向北小幅震荡升高趋势,中段受侏罗系地

层中弱磁性物质影响存在局部高值点;化极后 ΔT 曲线存在多处高值,在 2800 m、7000 m 和 16420 m 处具有代表性,相应位置处曲线形态呈近“M”状的双峰夹一谷或单峰伴一谷形态(图 2)。

4.3 可控源音频大地电磁反演电阻率断面特征

EL7 线反演电阻率断面图中电阻率等值线多呈似层状平行分布,局部表现为纵向分布,由浅至深表现为低~中~高阻特征,上部为低阻层,反演电阻率值为(5~20) Ω·m,(2800~16420) m 段厚度较大;中部为中阻层,反演电阻率值为(45~150) Ω·m;深部为高阻层,反演电阻率值为(150~705) Ω·m,在剖面中段埋深较大,南北两端埋深较小。在剖面里程 2800 m 和 16420 m 处,等值线呈纵向密集分布,两侧电性分别呈高阻和低阻特征,差异显著(图 2)。

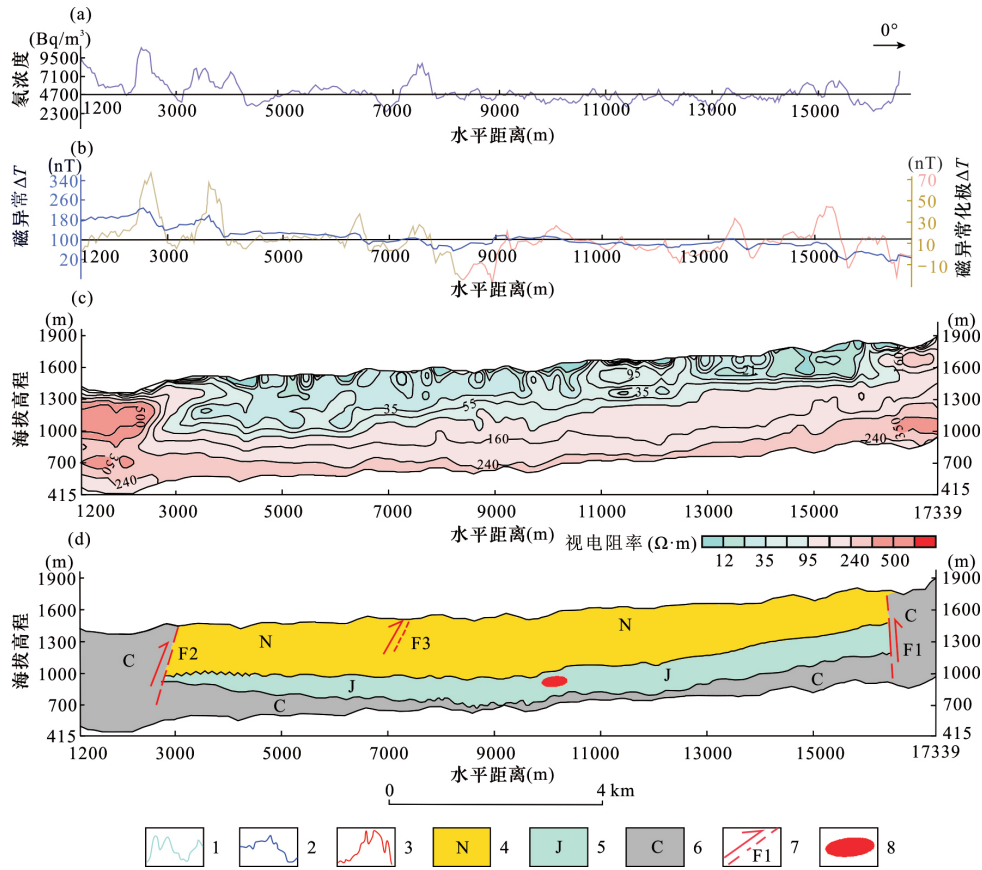


图 2 昭苏盆地 EL7 线综合物探成果地质-物探成果解译图

Fig. 2 Profile of geological-physical interpretation of EL7 line in the Zhaosu Basin

a - 土壤氡气浓度曲线; b - 磁测曲线图; c - 视电阻率等值线图; d - 地质-综合物探解译图; 1 - 土壤氡气浓度曲线; 2 - 磁异常 ΔT 曲线; 3 - 化极后 ΔT 曲线; 4 - 新近系; 5 - 侏罗系; 6 - 石炭系; 7 - 断裂构造; 8 - 推断铀矿体

a - soil radon concentration curve; b - magnetic curve; c - apparent resistivity contour; d - geological-geophysical interpretation profile; 1 - soil radon concentration curve; 2 - magnetic anomaly ΔT curve; 3 - ΔT curve after polarization; 4 - Neogene; 5 - Jurassic; 6 - Carboniferous; 7 - fault; 8 - inferred uranium ore body

4.4 综合物探法成果推断解释

结合以往地质、钻探资料和本次可控源音频大

地电磁测量、高精度磁测和土壤氡气测量成果综合分析、推断:

(1) EL7 线中上部的低阻层为新近系,中段厚度较大,在南北两端厚度较小;中段的中阻层为侏罗系,侏罗系顶板最大埋深 630 m,分布范围 2800 ~ 16420 m,受断裂控制明显;下部的高阻层为石炭系,南北两端埋深小,中段埋深大的特点,在剖面 11000 m 处埋深最大,为 910 m。

(2) EL7 线中段发育侏罗系,9400 ~ 13000 m 段磁测  $\Delta T$  曲线缓慢升高,10000 m 处化极后  $\Delta T$  曲线存在一小幅高值磁异常,推测该磁异常是由还原状态下的铁质胶结物引起,并有一处氦气异常偏高晕,综合推断该地段的侏罗系地层中发育有铀矿体。

(3) 剖面 2800 m、7000 m 和 16420 m 处土壤氦气浓度曲线、磁测曲线形态为峰-谷状,电阻率曲线呈纵向密集分布特征,推断分别存在断裂构造 F2、F3 和 F1。其中 F2 倾向朝南,倾角 70°; F1 倾向朝北,倾角 80°,断距均较大,形成于晚石炭世末期; F3 倾向朝北,倾角 60°,断距较小,形成时期为新近纪。

## 5 技术创新

### 5.1 采用综合物探方法对地层进行探查

首次在昭苏盆地同时使用放射性、磁法、电法寻找砂岩型铀矿,通过新、老物探方法组合(刘波等, 2019),利用不同方法的地球物理特性互为补充(王耀辉, 2012),对 EL7 线的放射性特征、磁性特征和电性特征进行探查。利用综合物探成果对 EL7 线各地层进行了划分,探测铀异常信息,对断裂构造发育情况进行调查,解决了深埋藏条件下赋矿地质体的圈定难点。

### 5.2 利用可控源音频大地电磁测量实现找矿深度突破

昭苏盆地覆盖层以中、低阻为主,厚度较大,利用可控源音频大地电磁测量探测深度大的特点,突破了以往伊犁盆地砂岩型铀矿最大 600 m 的找矿深度。

## 6 结论

通过创新物探方法组合,在昭苏盆地砂岩型铀矿取得了较好的中深部找矿效果,主要成果如下:

(1) EL7 线侏罗系物性特征表现为电性稳定的中阻厚层;磁性特征表现为宽缓的弱磁性异常,其中的局部高值点是砂岩型铀矿中深部找矿的磁性标志之一;氦气浓度特征为背景场,2800 m、7000 m 和 16420 m 三处断裂构造成为氦气运移良好通道,相应位置氦浓度异常属于偏高晕。综合以上推断 EL7 线中深部侏罗系中存在隐伏铀矿体。

(2) 高精度磁测和土壤氦气测量曲线在断裂构造处的曲线形态表现为双峰夹一谷的似“M”形或单峰伴一谷形态,是判断断裂构造的重要标志,对推断断裂构造具有良好的辅助作用;氦气及其子体沿断裂构造形成的运移通道迁移,在地表形成氦气浓度高值,对深部铀矿床具有重要的指示作用。

(3) 可控源音频大地电磁测量勘探深度大,对高阻层和低阻体均有良好的电性特征响应,利用此特性可以有效区分新近系、侏罗系和石炭系,查明地层、断裂构造和基底的埋深和空间形态。可结合高精度磁测和土壤氦气测量异常圈定有利成矿部位,在调查深覆盖区地层特征和构造断裂信息等方面取得了良好的勘探效果。

(4) 通过实践证明:对于铀矿工作程度较低的工区采用可控源音频大地电磁测量、高精度磁法和土壤氦气测量方法组合,分别测量地层的电阻率、磁性和放射性特征,每种方法有不同的技术特点,具有互补优势,提高了物探成果的准确性,在昭苏盆地深覆盖砂岩型铀矿勘查中显示出良好的找矿效果。

致谢:感谢项目组全体成员在数据采集过程中所做出的努力,保证了综合物探数据质量的可靠性;匿名专家对稿件的最终完善提供了宝贵意见,在此一并表示感谢!

### [References]

- Cai Yuqi, Zhang Jindai, Li Ziyang, Guo Qingyin, Song Jiye, Fan Honghai, Liu Wusheng, Qi Fucheng, Zhang Minglin. 2015. Outline of uranium resources characteristics and metallogenetic regularity in China [J]. Acta Geologica Sinica, 89(6): 1051 - 1069 (in Chinese with English abstract).
- Chen Cong, Yu Xiang, Chen Tao. 2017. Study on the mechanism of magnetic anomaly in the redox transitional zone of Bayanwula uranium deposit [J]. Geological Review, 63(S): 55 - 56 (in Chinese with English abstract).
- Chen Fenxiang, Nie Fengjun, Zhang Chengyong. 2016. Mesozoic structural styles and their relationship with uranium deposits in the southern margin of Yili Basin [J]. Geology and Exploration, 52(3): 480 - 488 (in Chinese with English abstract).
- Chen Hu, Fu Jin, Gong Yuling, Zhao Ningbo, Zhang Kai. 2015. Magnetic field characteristics and geological explanation for interlayer oxidation zone sandstone type uranium deposit in Wukuerqi [J]. World Nuclear Geoscience, 32(1): 39 - 45 (in Chinese with English abstract).
- Deng Juzhi, Liu Qingcheng, Gong Yuling, Fang Gengxian. 2004. Application of soil magnetism survey to prospecting for in-situ leachable sandstone-type uranium deposit [J]. Uranium Geology, 20(6): 370 - 375 (in Chinese with English abstract).
- Ding Bo, Liu Hongxu, Li Ping, Jiang Hong, Zhang Hujun, Zhang Bin. 2019. The tectonic activity in the southern margin of the Ili Basin and its constraint on sandstone-type uranium deposits: Evidence



- from apatite fission track and U - Pb dating [J]. Journal of Geomechanics 25( S1) : 84 - 89 ( in Chinese with English abstract ) .
- Feng Xuliang ,Liu Bin. 2019. Gravity and magnetic field characteristics and hydrocarbon prospects of the Nanweixi Basin [J]. Journal of Geomechanics 25( 1) : 105 - 114( in Chinese with English abstract ) .
- Fu Jin ,Han Yaozhao. 2003. Discussion on the relationship between emanation coefficient tailings and moisture content of uranium [J]. Journal of Nanhua university( Science & Engineering Edition ) ,17( 3) : 29 - 32( in Chinese with English abstract ) .
- Fu Jin ,Zhao Ningbo ,Liu Junping ,Cai Yuqi ,Liu Hongxu ,Liu Tao. 2015. Magnetic anomaly based position study of redox transitional zone for sandstone uranium deposit [J]. Uranium Geology ,31( S1) : 232 - 238( in Chinese with English abstract ) .
- Guo Qingyin ,Cai Yuqi ,Zhu Pengfei. 2012. Prediction methodology on potential evaluation of uranium resources in China [J]. Uranium Geology 28( 6) : 327 - 334( in Chinese with English abstract ) .
- Han Yaofei ,Sun Yuanbin ,Zhu Dawei ,Li Shulin. 2021. Application of audio magnetotelluric method and radon measurement in a geothermal survey in Jinsha County [J]. Coal Technology ,40( 1) : 46 - 49( in Chinese with English abstract ) .
- Jiang Hong ,Wang Fangxia ,Fang Min. 2015. Relationship between sand-body and uranium mineralization in Mengqiguer deposit in the southern margin of Yili Basin [J]. Uranium Geology ,31( S1) : 213 - 218 ( in Chinese with English abstract ) .
- Liu Hongxu ,Zhang Xiao ,Ding Bo ,Pan Chengyu. 2015. Metallogenic model and prospecting orientation of sandstone type uranium deposits in the southern margin of Yili Basin [J]. Uranium Geology ,31( S1) : 198 - 205( in Chinese with English abstract ) .
- Liu Bo ,Shi Zhiqiang ,Peng Yunbiao ,Zhang Pengfei ,Li Peng. 2019. Review on metallogenic characteristics and exploration methods of sandstone - type uranium deposits in superimposed Basins in the Xingmeng area ,northern China [J]. Geology and Exploration ,55( 6) : 1343 - 1355( in Chinese with English abstract ) .
- Liu Hu ,Liu Zhangyue ,Ke Dan ,Yao Shancong. 2009. Study on positioning technique of interlayer oxidation zone sandstone hosted uranium deposit based on high resolution magnetic survey [J]. Uranium Geology 25( 5) : 296 - 302( in Chinese with English abstract ) .
- Li Mao ,Wang Limin ,Xu Diqiao. 2005. Application of controlled - source audio magnetotelluric method to metallogenic geologic environment of sandstone - type uranium deposit [J]. Uranium Geology ,21( 6) : 353 - 359( in Chinese with English abstract ) .
- Li Shengfu ,Wang Mou. 2006. Analysis on ore - formation conditions of sandstone - type uranium deposits in Zhaosu Basin - Comparison between Zhaosu Basin and Yili Basin [J]. World Nuclear Geoscience ,23( 2) : 78 - 85( in Chinese with English abstract ) .
- Li Shengfu ,Chen Hongde ,Qiu Yubo ,Xu Xinwen ,Ren Manchuan ,Wang Mou. 2018. Sedimentary cycle division of Jurassic in the southwestern margin of Yili Basin and its relation to uranium mineralization [J]. Nuclear Science and Engineering 38( 5) : 888 - 899( in Chinese with English abstract ) .
- Li Yingbin ,Li Yi ,Wei Bin ,Liu Bo ,Zhang Zhanbin ,Yang Ming. 2019. Application of CSAMT and shallow seismic reflection to uranium in southwestern Songliao Basin [J]. Geology and Exploration ,55( 6) : 1442 - 1451( in Chinese with English abstract ) .
- Luo Qibin ,Yang Yaxin ,Zhang Ye ,Wu Xinmin ,Zheng Yongming ,Zhao Baiyu. 2018. Application and current status of geogas prospecting in concealed uranium deposits exploration [J]. Advances in Earth Science 33( 1) : 75 - 84( in Chinese with English abstract ) .
- Leng Dongling. 2020. A basic characteristics of magnetic anomaly judging the intersection site of fault structures [J]. Uranium Geology ,163( 2) : 110 - 114( in Chinese with English abstract ) .
- Qin Shouping. 2019. Exploration method and practice of north and south Ili coalfield in Ili Basin [J]. Acta Geologica Sinica 93( S1) : 53 - 60 ( in Chinese with English abstract ) .
- Ren Manchuan ,Li Xiaohong ,Zhang Quanqing. 2011. Research on Jurassic groundwater development and uranium resources in the southern margin of Yili Basin [J]. Uranium Geology ,27( 4) : 225 - 230( in Chinese with English abstract ) .
- Wang Yaohui. 2012. Application of gravity magnetic - electricity comprehensive exploration technique in Zhaosu - Tekes depression of Yili Basin [J]. Journal of Oil and Gas Technology ,34( 12) : 45 - 50( in Chinese with English abstract ) .
- Wang Haofeng ,Liu Bo ,Chen Shuang ,Chen Fengxing ,Xue Wenhao. 2019. Application of integrated geophysical survey to sedimentary rock type uranium exploration in the Erlan Basin [J]. Geology and Exploration ,55( 1) : 127 - 134( in Chinese with English abstract ) .
- Wang Wei ,Huang Yulong ,Liu Bo ,Qin Yanwei ,Yan Xiaobo ,Dong Xushu ,Hao Peng. 2019. Application of the CSAMT method and soil radon measurement in surveys for sandstone - type uranium deposits: An example of the Bayinhanggai area ,Inner Mongolia [J]. Geology and Exploration ,55( 5) : 1141 - 1249( in Chinese with English abstract ) .
- Wan Hanping ,Cheng Jixing ,Yu Xiang. 2020. Locating favorable metallogenic space of sandstone - type uranium ore in interlayer oxidation zones: An example in the eastern margin of Junggar Basin [J]. Geology and Exploration ,56( 1) : 26 - 36( in Chinese with English abstract ) .
- Yang Longquan ,Li Bihong ,Zhao Dan ,Wu Rujie. 2020. Numerical simulation for radon migration in the homogeneous overburden layer above uranium ore body [J]. Uranium Geology ,36( 5) : 441 - 452( in Chinese with English abstract ) .
- Zhang Geng ,Tuo Xianguo ,Wang Kaiyang ,Li Bin. 2013. Application of multi - electrical resistivity method and radon gas survey to concealed fault exploration in mining area [J]. Metal Mine ,42( 8) : 74 - 83( in Chinese ) .
- Zhang Jindai ,Xu Gaozhong ,Lin Jinrong ,Peng Yunbiao ,Wang Guo. 2010. The implication of six kinds of new sandstone - type uranium deposits to uranium resources potential in north China [J]. Geology in China 37( 5) : 1434 - 1449( in Chinese with English abstract ) .
- Zhang Lijian ,Wang Chen ,Fu Zhiqing ,Fu Rongqin ,Fu Xinjian ,Xie Peng ,Wang Ruiquan. 2013. Application of magnetic prospecting in search deep concealed orebody [J]. Hebei Geology ,55( 1) : 37 - 39 ( in Chinese ) .

## [附中文参考文献]

蔡煜琦, 张金带, 李子颖, 郭庆银, 宋继叶, 范洪海, 刘武生, 漆富成,

- 张明林. 2015. 中国铀矿资源特征及成矿规律概要[J]. 地质学报, 89(6): 1051–1069.
- 陈聪, 喻翔, 陈涛. 2017. 巴彦乌拉铀矿床氧化还原过渡带磁异常产生机理研究[J]. 地质评论, 63(5): 55–56.
- 陈奋雄, 聂逢君, 张成勇. 2016. 伊犁盆地南缘中新世构造样式与成矿关系[J]. 地质与勘探, 52(3): 480–488.
- 陈虎, 付锦, 龚育龄, 赵宁博, 张凯. 2015. 乌库尔其层间氧化带砂岩型铀矿床磁测特征及解释[J]. 世界核地质科学, 32(1): 39–45.
- 邓居智, 刘庆成, 龚育龄, 方根显. 2004. 土壤磁性测量在寻找可地壳砂岩型铀矿床中的应用[J]. 铀矿地质, 20(6): 370–375.
- 丁波, 刘红旭, 李平, 蒋宏, 张虎军, 张宾. 2019. 伊犁盆地南缘构造活动及对砂岩型铀矿的制约: 来自磷灰石裂变径与 U–Pb 定年的证据[J]. 地质力学学报, 25(S1): 84–89.
- 冯旭亮, 刘斌. 2019. 南薇西盆地重磁场特征及油气资源远景[J]. 地质力学学报, 25(1): 105–114.
- 付锦, 韩耀照. 2003. 氦射气系数与铀尾矿含水率关系探讨[J]. 南华大学学报(理工版), 17(3): 29–32.
- 付锦, 赵宁博, 刘俊平, 蔡煜琦, 刘红旭, 刘涛. 2015. 基于磁异常的砂岩型铀矿氧化还原过渡带定位[J]. 铀矿地质, 31(S1): 232–238.
- 郭庆银, 蔡煜琦, 朱鹏飞. 2012. 全国铀矿资源潜力评价的技术路线与操作流程[J]. 铀矿地质, 28(6): 327–334.
- 韩姚飞, 孙远彬, 朱大伟, 李树林. 2021. 音频大地电磁法和氦气测量在金沙县某地热调查中的应用[J]. 煤炭技术, 40(1): 46–49.
- 蒋宏, 王芳霞, 方敏. 2015. 伊犁盆地南缘蒙古其古尔铀矿床含矿砂体与铀成矿的关系[J]. 铀矿地质, 31(S1): 213–218.
- 刘红旭, 张晓, 丁波, 潘澄雨. 2015. 伊犁盆地南缘砂岩型铀矿成矿模式与找矿方向[J]. 铀矿地质, 31(S1): 198–205.
- 刘波, 时志强, 彭云彪, 张鹏飞, 李鹏. 2019. 中国北方兴蒙地区叠合盆地砂岩型铀成矿特征及勘查方法综述[J]. 地质与勘探, 55(6): 1343–1355.
- 刘祐, 刘章月, 柯丹, 腰善丛. 2009. 层间氧化带砂岩型铀矿床的高精度磁测定位技术研究[J]. 铀矿地质, 25(5): 296–302.
- 李茂, 王利民, 许第桥. 2005. 可控源音频大地电磁测量法在砂岩型铀成矿地质环境研究中的应用[J]. 铀矿地质, 21(6): 353–359.
- 李盛富, 王谋. 2006. 昭苏盆地砂岩型铀成矿条件分析[J]. 世界核地质科学, 23(2): 78–85.
- 李盛富, 陈洪德, 邱余波, 徐新文, 任满船, 王谋. 2018. 伊犁盆地西南缘侏罗系沉积旋回划分及其与铀成矿的关系[J]. 核科学与工程, 38(5): 88–899.
- 李英宾, 李毅, 魏滨, 刘波, 张占彬, 杨明. 2019. CSAMT 和浅层地震在松辽盆地西南部铀矿勘查中的应用[J]. 地质与勘探, 55(6): 1442–1451.
- 罗齐彬, 杨亚新, 张叶, 吴信民, 郑永明, 赵柏宇. 2018. 地气测量在隐伏铀矿找矿中的应用与现状[J]. 地球科学进展, 33(1): 75–84.
- 冷冬灵. 2020. 判断构造交点的一个基本的磁异常特征[J]. 铀矿地质, 36(2): 110–114.
- 秦守萍. 2019. 伊犁盆地伊北和伊南煤田勘查方法与实践[J]. 地质学报, 93(S1): 53–60.
- 任满船, 李晓红, 张全庆. 2011. 伊犁盆地南缘侏罗系地下水演化及铀源分析[J]. 铀矿地质, 27(4): 225–230.
- 王耀辉. 2012. 重磁电综合勘探技术在伊犁盆地昭苏–特克斯拗陷的应用[J]. 石油天然气学报, 34(12): 45–50.
- 王浩峰, 刘波, 陈霜, 陈凤兴, 薛文浩. 2019. 综合物探测量在二连盆地沉积岩型铀矿勘查中应用[J]. 地质与勘探, 55(1): 127–134.
- 王伟, 黄玉龙, 刘波, 秦彦伟, 颜小波, 董续舒, 郝鹏. 2019. CSAMT 与土壤氦气测量在砂岩型铀矿勘查中的应用: 以内蒙古巴音杭盖地区为例[J]. 地质与勘探, 55(5): 1141–1249.
- 万汉平, 程纪星, 喻翔. 2020. 层间氧化带砂岩型铀矿有利成矿空间定位—以准噶尔盆地东缘砂岩型铀矿探测为例[J]. 地质与勘探, 56(1): 26–36.
- 杨龙泉, 李必红, 赵丹, 吴儒杰. 2020. 铀矿体上方均匀覆盖层中氦迁移的数值模拟[J]. 铀矿地质, 36(5): 441–452.
- 张赓, 虞先国, 汪楷洋, 李彬. 2013. 高密度电法–氦气测量在矿区隐伏断层勘查中的应用[J]. 金属矿山, 42(8): 74–83.
- 张金带, 徐高中, 林锦荣, 彭云彪, 王果. 2010. 中国北方 6 种新的砂岩型铀矿对铀资源潜力的提示[J]. 中国地质, 37(5): 1434–1449.
- 张立剑, 王臣, 沈志清, 付荣钦, 付新建, 解鹏, 王瑞权. 2013. 磁法勘查在寻找深部隐伏矿体中的应用[J]. 河北地质, 55(1): 37–39.

## Prospecting Middle and Deeply Buried Sandstone – Type Uranium Deposits Beneath the Zhaosu Basin , Xinjiang by Integrated Geophysical Methods

HUANG Jianle ,CHEN Xiaodong ,LI Jiajin ,SHAN Caote ,HAO Yize  
( Geological Party No. 216 ,CNNC Urumqi ,Xinjiang 830011)

**Abstract:** The objective of this work was to explore the deeply buried sandstone – type uranium deposits beneath the Zhaosu Basin ,Xinjiang by integrated geophysical methods. Three geophysical methods were used ,including controllable – source audio magnetotellurics ( CSAMT ) ,high – precision magnetics ( HPM ) ,and gamma – ray – logging – based soil radon measurement ( SRM ) . Combined with the data of geology and physical properties in the basin ,the survey anomalies were interpreted for ore – search information. Results show that the CSAMT has good electrical response to low – and high – resistance targets ,permitting to divide strata and infer fault structure. The HPM can assist to explain the fault structure and morphology of the basement ,and SRM can also assist in the interpretation of fault structure with an indicator of uranium deposits. Due to distinct technical characteristics ,the three methods complement each other and improve the accuracy of geophysical interpretation. This work broke through the limit of the previous 600 m prospecting depth in the Yili Basin ,found the prediction marks as the medium resistivity thick layer ,high radon anomaly and peak – valley curve ,and solved the difficulties of delineating ore – bearing geological bodies at depth. In sum ,a good effect has been obtained in the prospecting of middle and deeply – buried sandstone – type uranium deposits in the Zhaosu Basin.

**Key words:** sandstone – type uranium deposit ,CSAMT – high – precision magnetics – soil radon measurement ,integrated geophysical method ,resistivity middle and deep prospecting ,Zhaosu Basin ,Xinjiang